

杨建勋,郑恩楠,孟凡香,等. 不同农业管理措施对秸秆还田水稻产量和甲烷排放影响的 Meta 分析[J]. 江苏农业科学,2026,54(13):260-268.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2026.13.032

不同农业管理措施对秸秆还田水稻产量和甲烷排放影响的 Meta 分析

杨建勋,郑恩楠,孟凡香,赵 微,杜 崇,臧彦超,龙夏榆

(黑龙江大学水利电力学院,黑龙江哈尔滨 150080)

摘要:秸秆还田作为绿色可持续的农业生产方式,已有很多学者对其增产和 CH_4 排放效应进行评估,但很多学者忽略了不同的农业管理措施对秸秆还田后的增产和 CH_4 排放效应的影响。基于 414 组研究数据,以自然对数比 ($\ln R$) 作为效应值,采用随机效应模型进行 Meta 分析,评估秸秆还田后不同农业管理措施对水稻产量和 CH_4 排放的影响。结果表明,秸秆还田会增加水稻产量(4%)和 CH_4 排放量(44.3%)。不同农业管理措施对增产效应和 CH_4 的排放效应会造成影响:(1)产量与秸秆还田量呈显著正相关,当秸秆还田量 $>9\,000\text{ kg/hm}^2$ 时增产效果达 12.4%; CH_4 排放对秸秆还田量的响应存在阈值效应,当还田量增至 $6\,000\sim 9\,000\text{ kg/hm}^2$ 时,其对 CH_4 的促进效应较 $3\,000\sim 6\,000\text{ kg/hm}^2$ 下降 9.6%。(2)施氮量为 $200\sim 250\text{ kg/hm}^2$ 时,对产量增幅最明显,可达 10.1%;施氮量 $<150\text{ kg/hm}^2$ 时,对 CH_4 排放增加效应最小,为 25.7%。(3)秸秆还田年限 >6 年可以增产 5.9%,而 CH_4 的排放量随还田年限呈现先降后升的趋势。(4)秸秆混施较秸秆覆盖在增产和减排方面均表现更优。(5)对 4 种不同的耕作方式而言,免耕和犁耕都约增产 5%,但犁耕的 CH_4 排放增幅(34.4%)显著低于免耕(46.4%)。(6)不同秸秆类型中,油菜秸秆在增产和减排方面综合表现最优。此外,通过构建随机森林模型发现,秸秆还田量、氮肥施用量以及秸秆类型是影响水稻产量效应和 CH_4 排放效应的最主要因素。

关键词:秸秆还田;水稻;产量; CH_4 排放;农业管理措施;Meta 分析;随机森林模型

中图分类号:F323.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2026)13-0260-08

水稻是我国主要粮食作物之一,其种植面积约占全国作物种植面积的 1/3,产量占全国总粮食产量的 40% 以上^[1],其稳步增产对我国农业生产和粮食安全具有重要意义。同时,稻田也是我国主要的 CH_4 来源之一,其排放量约占我国农业生产 CH_4 总排放量的 17.83%^[2]。如今全球变暖问题愈发严峻, CH_4 排放使全球地表温度上升 $0.5\text{ }^\circ\text{C}$ ^[3]。因此,如何通过合理的农业管理措施实现增产减排是农业面临的重大问题。传统管理模式如施肥等手段会导致土壤酸化,降低微生物多样性,不利于可持续发展^[4]。秸秆是农业生产的残留物质,它富含作物生长发育所需的有机质、氮、磷、钾等养分,且其

所含丰富的钙、镁等碱性金属离子还田后还可提高酸性水稻土的碱性物质输入量,减缓水稻土酸化速率^[5]。2015 年中国秸秆产量达到 10.4 亿 t,利用量却仅有 7 亿 t^[6]。尽管我国秸秆利用率已经在不断提升,但有关研究结果显示,截至 2020 年底我国仍有 1.2 亿 t/年的秸秆没有得到有效利用^[7]。未得到充分利用的秸秆大都被焚烧,会增加温室气体的排放,并导致大量固体颗粒排放至大气形成雾霾,严重威胁人们的身体健康^[8]。秸秆还田不仅可以提高秸秆利用率,还是一种可持续、绿色的农业生产方式^[9-10]。目前,世界上已经有众多学者对秸秆还田的增产减排效应进行研究,秸秆作为高碳源物质,其还田可以有效增加土壤碳库容量,提高土壤固碳能力^[11],此外还提供了增加土壤肥力的直接来源^[12]。叶子壮等在试验中也发现,相较于常规栽培秸秆还田可以显著提高土壤中全氮(TN)、全磷(TP)、全钾(TK)的含量^[13],这些元素可以更好地促进作物生长。但是秸秆还田后的增产效应仍然受农业管理措施的影响。孟宪喆等认为,在秸秆还

收稿日期:2025-07-29

基金项目:黑龙江省属高校基本科研业务费(编号:2022-KYYWF-1074)。

作者简介:杨建勋(1998—),男,江苏盐城人,硕士,主要从事农业水土资源高效利用研究。E-mail:yjx18822132712@163.com。

通信作者:郑恩楠,博士,副教授,主要从事农业水土资源高效利用研究。E-mail:2020024@hlju.edu.cn。

田后不同施氮方式可以显著影响作物产量^[14];贾瑞峰等则认为,作物增产率与秸秆还田年限成正比例关系^[15]。此外,秸秆还田对于稻田 CH_4 排放的影响也存在争议,如 Jiang 等认为秸秆还田可以改善土壤结构,促使 CH_4 氧化,降低 CH_4 排放^[16];蒋静艳等则发现,秸秆还田在连续淹水环境条件下,一方面会消耗土壤中的氧,降低土壤氧化还原电位,继而使土壤产甲烷菌(mcrA)群落结构及数量发生改变,促进 CH_4 排放^[17]。杨正宇等认为,秸秆还田在短期内会增加 CH_4 的排放,但在经过长时期(>11 年)还田后可以有效降低 CH_4 的排放^[18]。

由此可见,秸秆还田对水稻产量和稻田温室气体排放的影响受氮肥施用量、秸秆还田年限、秸秆还田量等多个农业管理措施的影响,研究结果呈不同趋势。因此,本研究通过 Meta 分析和搜集到的 75 篇文献的 414 组数据,整合多项独立研究结果,以无秸秆还田为对照定量分析水稻产量和 CH_4 排放对不同农业管理措施的响应,评估和量化特定农业管理措施对水稻产量和 CH_4 排放效应的影响,以期为保障我国粮食安全和减少温室气体排放提供最佳的农业管理措施。

1 数据和方法

1.1 数据来源

本研究收集了 2025 年 1 月 1 日之前已发表的

文章。在知网(CNKI)(<https://www.cnki.net/>)和 Web of Science(<https://www.webofscience.com/>)上使用“秸秆”“秸秆还田”“水稻”“产量”“温室气体排放”“ CH_4 ”“甲烷”等关键词进行检索;并进行手工筛选,本研究科技路线图见图 1。最终确定的数据要遵循以下标准:(1)试验区域必须位于中国,并且试验只能位于田间,所有的盆栽试验、箱内试验等不包含在本次研究范围内,试验地点、试验日期必须交代明确。(2)所有的试验必须以无秸秆还田作为对照组(CK),秸秆还田作为处理组(TR);此外试验组和处理组的所有试验条件应该保持相同。(3)试验重复次数至少达到 3 次,试验至少给出水稻产量或稻田 CH_4 排放量的均值和标准误差,对于少部分缺少的标准误差可以采用均值的 1/10 来代替^[19]。此外,本研究还搜集了以下数据:(1)试验地的准确经纬度坐标,用来绘制试验地分布图(图 2);(2)施氮量、秸秆还田量、还田方式、还田年限、还田秸秆类型等农业管理措施。

1.2 数据分类

根据上述标准共筛选出 75 篇符合要求的文献,一共包含 249 组产量数据和 165 组 CH_4 排放数据。对所得数据进行如下分类:第一,施氮量分为 <150、150~200、200~250、>250 kg/hm^2 ;第二,秸秆还田量分为 <3 000、3 000~6 000、6 000~9 000、>9 000 kg/hm^2 ;第三,还田年限分为 <3、3~6、>6

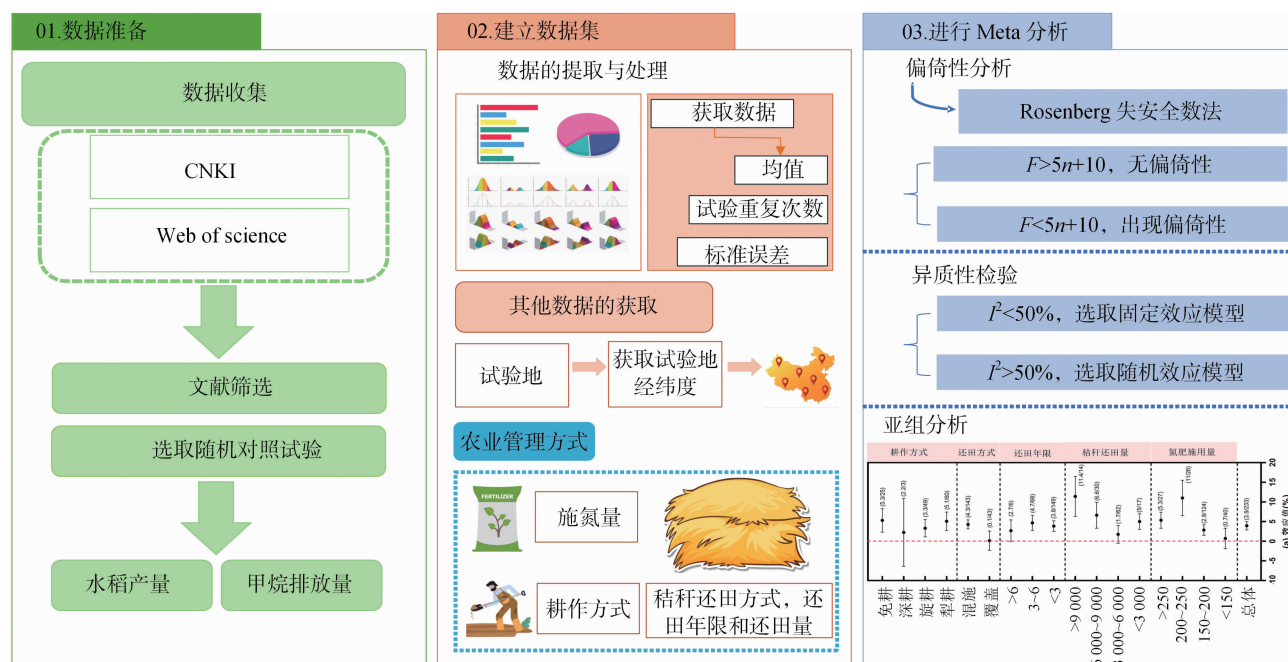


图1 科技路线图示

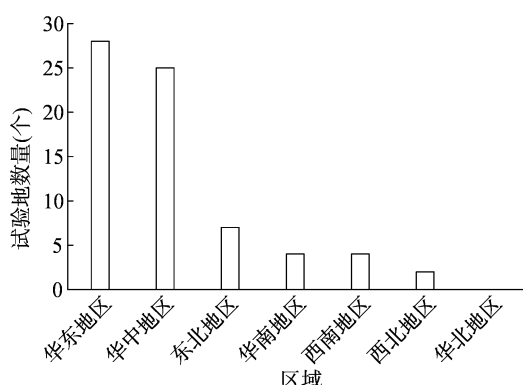


图2 试验地分布情况

年;第四,秸秆还田方式分为覆盖和混施;第五,耕作方式分为免耕、旋耕、犁耕和深耕,还田秸秆类型分为水稻秸秆、小麦秸秆、油菜秸秆。

1.3 数据分析

由于产量和 CH_4 排放量的 I^2 均大于 50%, 本次 Meta 分析采用随机效应模型。本研究选取 $\ln R$ 作为效应值,其计算公式见式 1。

$$\ln R = \ln \left(\frac{X_T}{X_C} \right) \quad (1)$$

式中: X_T 表示 TR 的平均值; X_C 表示 CK 的平均值。当 $\ln R > 0$ 时,表示秸秆还田对水稻产量和 CH_4 排放量具有促进作用;当 $\ln R < 0$ 时,则表示秸秆还田对水稻产量和 CH_4 排放量具有抑制作用。

与 $\ln R$ 对应的方差 V_i 计算公式为

$$V_i = \frac{S_T^2}{N_T Y_T^2} + \frac{S_C^2}{N_C X_C^2} \quad (2)$$

式中: S_T 、 S_C 分别表示 TR、CK 的标准差; N_T 、 N_C 分别表示 TR、CK 的样本量。

加权因子 ω_i 、加权反应比 (R_+)、 R_+ 的标准误 (SE) 和 R_+ 的 95% 置信区间 (CI) 计算如下:

$$\omega_i = \frac{1}{(V_i + \tau^2)} \quad (3)$$

$$R_+ = \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^k \omega_{ij} R_{ij}}{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^k \omega_{ij}} \quad (4)$$

$$SE = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^k \omega_i}} \quad (5)$$

$$CI = R_+ \pm 1.96 \times SE \quad (6)$$

式中: i 、 j 分别表示第 i 、第 j 次处理; m 、 k 分别表示对照组和在每一对应组内所进行的比较次数。当 95% 置信区间大于 0 时,则认为与 CK 相比 TR 的研

究结果获得显著提升;若小于 0,则认为与 CK 相比 TR 的研究结果获得显著抑制;若其与 0 重叠,则无显著效果。

此外,本研究还使用“rPute”软件包进行随机森林分析,以此来确定对变量造成影响的各变量相对重要性。

1.4 偏倚性分析

使用 Rosenberg's 失安全数评估发表偏倚,如果失安全数 $> 5N + 10$,则认为该故障安全数是稳健和可靠的,其中: N 表示研究中包含的观察结果数量^[20]。

1.5 数据处理

本研究采用 Microsoft Excel 对所有试验数据的均值、标准差进行计算与收录。使用 Openmee 软件基于最大似然估计法 (REML) 计算 $\ln R$ 、 R_+ 、95% CI^[21];使用 GraphPad Prism 9.5 生成森林图和频数分布图。

2 结果与分析

2.1 秸秆还田对水稻产量和 CH_4 排放的总体影响

水稻产量的 $\ln R$ 值全都服从正态分布,且 CH_4 的 $\ln R$ 值只是发生了轻微偏离,仍可以使用随机效应模型进行数据处理^[22] (图 3)。水稻产量、 CH_4 排放量的失安全数分别为 30 830、305 995 (表 1)。所有数值都远大于 $5N + 10$,表明本研究没有发生偏倚,研究数据可靠。秸秆还田总体提升了水稻产量 4% (3% ~ 5%) (图 4 - a), CH_4 排放量增加了 43.6% (37.8% ~ 49.4%) (图 5 - a)。

2.2 不同农业管理措施对秸秆还田后产量的影响

田间管理措施的差异导致秸秆还田后水稻增产效应不同 (图 4)。不同耕作方式给水稻带来的增产效应如下:免耕的增产效应最高 5.3% (2.3% ~ 8.3%);犁耕次之,增产效应达到 5% (2.8% ~ 7.3%) (图 4 - f);深耕的增产效应并不显著。秸秆混施的还田方式可以使水稻增产 4.6% (3.5% ~ 5.7%),秸秆覆盖的增产效应并不显著 (图 4 - e)。还田年限和秸秆还田量对增产效应的影响呈现出正向趋势,当秸秆还田年限 > 6 年时,增产效应最大为 5.9% (3.3% ~ 8.4%)。当秸秆还田量 $> 9 000 \text{ kg/hm}^2$ 时,增产效应最大为 12.4% (7.0% ~ 17.7%) (图 4 - c、图 4 - d)。随着施氮量的增加,水稻的增产效应出现先增加后减小的趋势。当施氮量为 200 ~ 250 kg/hm^2 时,增产效应达到最高,为

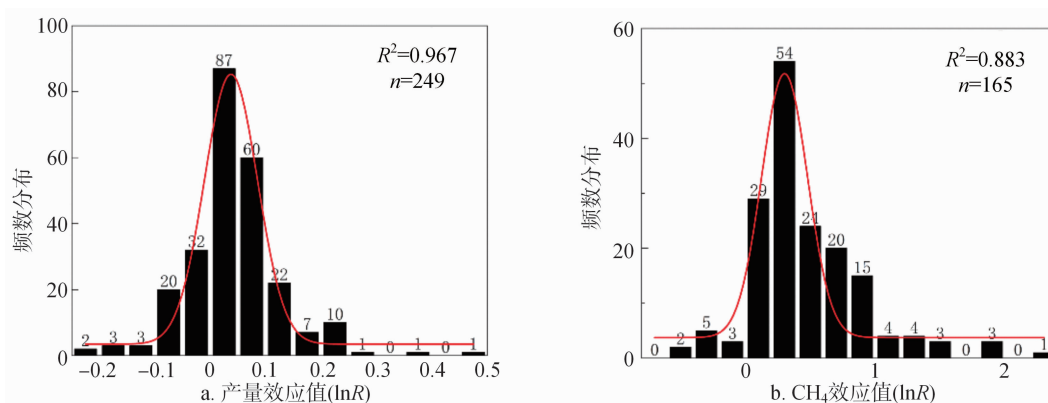
图3 水稻产量以及水稻 CH₄ 排放的效应值频数分布

表 1 失安全数及整体异质性检验

指标	样本数 (个)	失安全数 (Fail-safe N)	I^2 (%)
产量	249	30 830	83.14
CH ₄	165	305 995	98.02

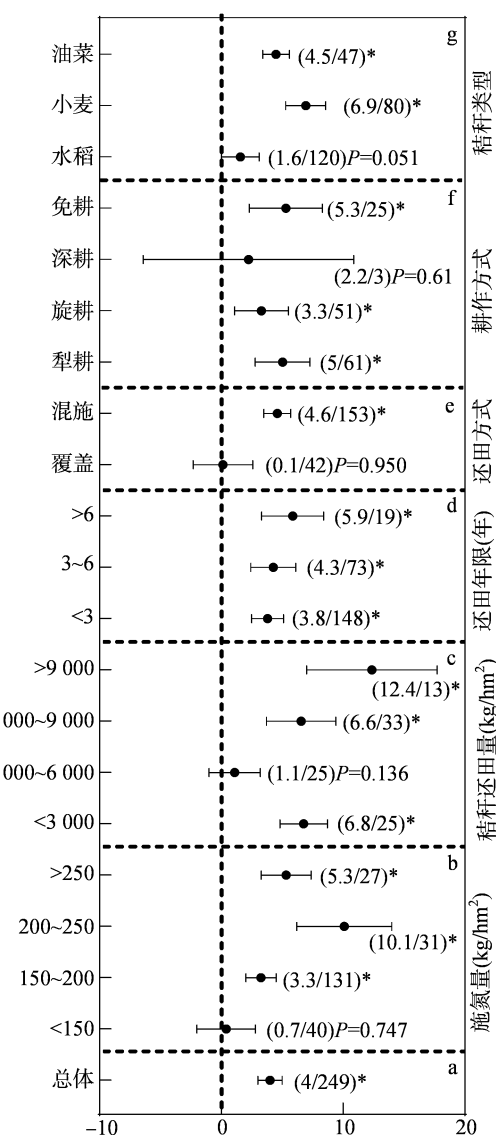
10.1% (6.2% ~ 14%) (图 4 - b)。小麦秸秆和油菜秸秆还田都对水稻产量表现出显著的正效应,效应值分别为 6.9% (5.3% ~ 8.6%)、4.5% (3.4% ~ 5.6%) (图 4 - g)。

2.3 不同农业管理措施对秸秆还田后稻田 CH₄ 排放效应的影响

田间管理措施的差异也会导致稻田 CH₄ 排放效果出现差别。4 种不同耕作方式都显著增加了稻田 CH₄ 的排放,其中旋耕增加 61.5% (46.5% ~ 76.4%);深耕增加 60.6% (38.5% ~ 82.6%);免耕增加 46.4% (31.1% ~ 61.8%);犁耕增加 27.9% (19.3% ~ 36.4%) (图 5 - f)。秸秆混施对 CH₄ 的增加效应 41.6% (34.4% ~ 48.8%) < 秸秆覆盖 52.3% (41.1% ~ 63.4%) (图 5 - e)。秸秆还田年限为 3 ~ 6 年时,对 CH₄ 的增产效应最小,为 32.6% (24.3% ~ 41%) (图 5 - d)。当秸秆还田量为 6 000 ~ 9 000 kg/hm² 时,CH₄ 的排放效应显著增加 52.4% (33.5% ~ 71.2%) (图 5 - c)。CH₄ 的排放效应随着氮肥施用量的增加而增加 (图 6 - d),在氮肥施用量 > 250 kg/hm² 时,CH₄ 排放效应最大,为 71.7% (52.6% ~ 90.8%) (图 5 - b)。油菜秸秆对 CH₄ 排放的增加效应最小,为 33.4% (14.4% ~ 52.4%)。

2.4 Meta 回归分析

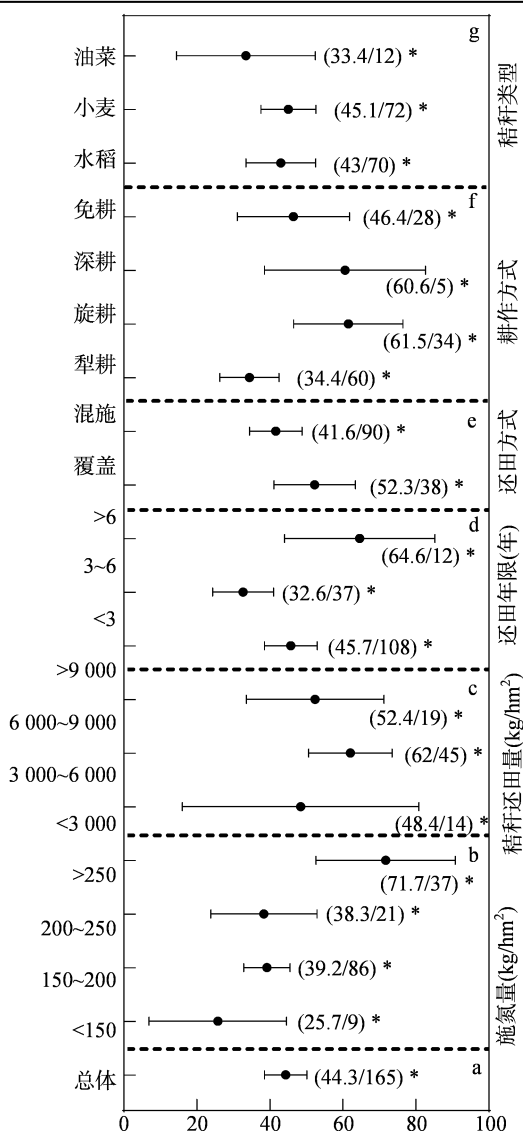
为解释水稻产量和 CH₄ 排放的异质性来源,构建 Meta 回归模型,模型中纳入施氮量,秸秆还田量,秸秆还田年限,秸秆还田方式,耕作方式及秸秆类



误差条表示 95%CI, 如果 CI 不超过零线, 则有显著影响 (P<0.05); 括号中的数字分别表示效应值和样本量

图4 不同农业管理措施对秸秆还田后增产效应的影响

型等协变量。计算过程使用 Openmee 完成,得到产量和 CH₄ 的模型 I^2 分别为 56.3%、68.96%。该模



误差条表示 95% CI, 如果 CI 不超过零线, 则有显著影响 ($P < 0.05$)。括号中的数字分别表示效应值和样本量

图5 不同农业管理措施对秸秆还田后 CH_4 排放效应的影响

型解释了 32.2% 的产量异质性和 29.6% 的 CH_4 异质性, 解释比例计算见公式(7)。剩余异质性来源可能来自自然因素(如年均温度、土壤质地等), 但本研究是为了探究不同农业管理措施对秸秆还田的效应影响, 因此其余因素暂不作考虑。

$$\text{Percentage reduction in } I^2 = \left(\frac{I^2_{\text{initial}} - I^2_{\text{model}}}{I^2_{\text{initial}}} \right) \times 100\% \quad (7)$$

式中: I^2_{initial} 表示初始 I^2 ; I^2_{model} 表示回归模型 I^2 。

2.5 各种因素对产量和 CH_4 排放效应的相对重要性

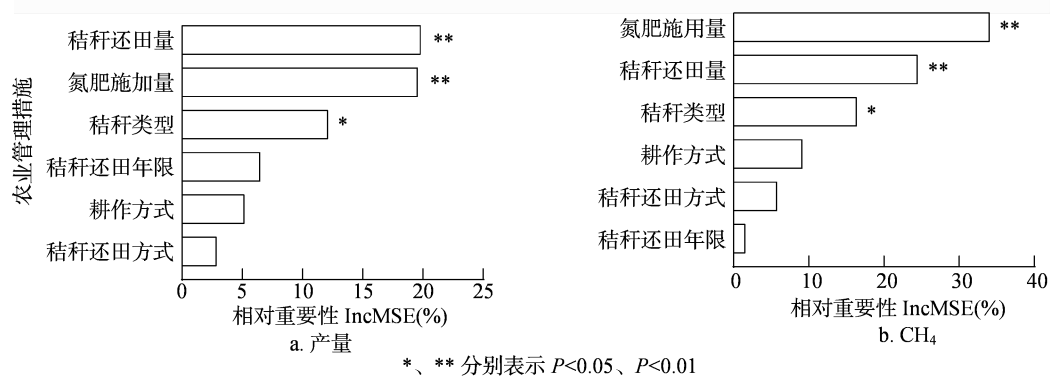
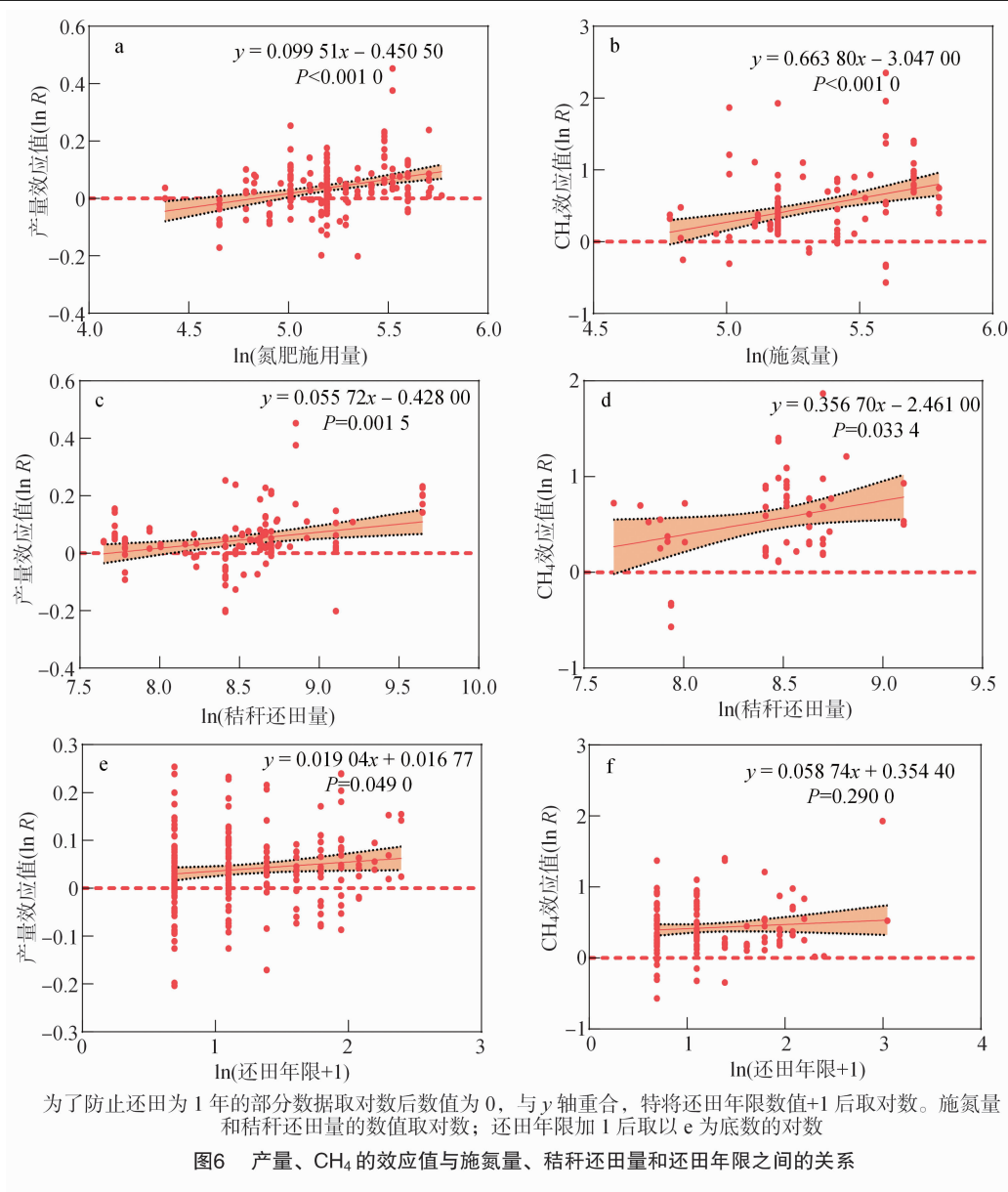
本研究以不同农业管理措施下水稻产量和稻田 CH_4 排放的效应值 $\ln R$ 为预测指标, 构建随机森

林模型[决策树数量 (ntree) = 1 000], 采用均方差增加值 (increase in mean square error, IncMSE) 对变量重要性进行评估(图 7)。秸秆还田量和氮肥施用量对水稻产量及稻田 CH_4 排放量影响最大。秸秆类型对产量(12.07%)和 CH_4 排放(16.3%)也具有显著影响。本研究使用留出法对模型进行验证, 随机选择 70% 的样本建模, 再用剩余 30% 数据的实测值和模型的预测值进行计算(表 2)。结果参数均符合生态学要求^[23], 说明该模型是可靠的。

3 讨论

3.1 不同农业管理措施对秸秆还田后水稻增产效应的影响

Lou 等通过全球尺度的 Meta 分析发现, 秸秆还田配施氮肥可以更好地提高作物产量^[24], 本研究结论与之一致。秸秆作为碳源还田后在田内分解会消耗土壤中的氮元素, 增加土壤的碳氮比(C/N), 所以秸秆还田需要配施氮肥, 以平衡土壤的 C/N, 提高微生物活性^[25]; 但过量施用氮肥也会造成土壤养分失衡, 从而降低作物的增产效应^[26]。本研究结果表明, 当施氮量在 200 ~ 250 kg/hm^2 之间时增产效应最好, 这与前人的研究结果^[27]一致。由于农作物秸秆养分丰富, 其还田可提高土壤有机碳和土壤肥力, 从而提高农作物产量。在本研究中, 增产效果与秸秆还田量呈正相关, 这与 Wang 等先前的研究结果^[28]一致。作物增产率随秸秆还田年限的增加有升高的趋势, 这与 Liu 等的研究结果^[29]相似。这是因为在秸秆还田短期阶段, 微生物会大量消耗土壤中的有效氮来促使秸秆分解, 土壤中可以供给作物的氮量减少, 导致作物增产效应低下^[30]。随着秸秆还田年限的增加, 土壤有机碳(SOC)逐渐得到积累并且秸秆分解释放的大量养分和氮素矿化为作物提供了稳定的养分来源, 这使得作物产量得到显著提升。秸秆混施和秸秆覆盖的增产效应有争议, Liu 等认为, 秸秆混施增加了秸秆与土壤微生物的接触面积, 提高了秸秆的分解率, 更显著地增加了水稻产量^[31], Qin 等的结果^[32]也论证了该想法。Tan 等认为, 秸秆覆盖可以减少地表径流所造成的养分流失, 从而更好地提高作物的增产效应^[33-34]。本研究认为, 秸秆混施可以显著增加水稻的产量, 而秸秆覆盖带来的增产效应则并不明显。不同的耕作方式对增产效应也有不同的效果, 本研究结果表明深耕对作物产量无显著影响, 一方面由于数据



缺乏仅有 2 组数据可能造成结果出现偏差,另一方面深耕会破坏土壤基础结构且大幅降低了土壤 SOC 含量^[35],从而降低作物产量;免耕法的耕层紧实度比较适宜,减缓了土壤有机物质的矿化率,有利于

有机质的积累和作物根系的生长,从而提高作物产量^[36]。小麦秸秆具有最高的 C/N,虽然在前期分解过程中消耗土壤中的氮素影响水稻生长,但其分解后可以显著提高水稻中后期生长指标,从而增加水

表 2 随机森林模型可靠性检验

模型	训练集百分比 (%)	验证集百分比 (%)	NRMSE	R ²
产量模型	70	30	0.119	0.443
CH ₄ 模型	70	30	0.160	0.610

稻产量;油菜秸秆富含的铵态氮(NH₄⁺ - N)^[37]可以直接被水稻吸收利用,从而显著提高产量。这一结论与胡诚等的研究结果^[38]一致。

3.2 不同农业管理措施对秸秆还田后 CH₄ 排放效应的影响

秸秆还田会显著增加稻田 CH₄ 的排放,Liu 等在一项全球性的研究中也得到了与相同的结论^[39]。这主要是因为秸秆本身含有大量的含碳基质,在秸秆还田后逐渐分解可以为甲烷菌提供有效的碳底物,从而促进 CH₄ 的排放^[40]。也有学者认为,随着秸秆还田年限的增加,秸秆还田可以减少 CH₄ 的排放,长期秸秆还田后土壤容重降低、土壤通气性较高、含氧量较高,气体在大孔隙土壤中能够快速扩散,使土壤中甲烷氧化菌(pmoA)等好氧微生物利用更多的氧气,从而减少 CH₄ 的排放^[18]。在秸秆还田初期,新鲜秸秆为 mcrA 提供了大量碳源,这导致 CH₄ 排放效应显著增加^[18];随着还田年限的增加,土壤容重降低,土壤通气性和含氧量增多,有利于 pmOA 的生长代谢,加速 CH₄ 氧化,使得 CH₄ 的排放效应出现下降^[16]。但长期秸秆还田使得土壤碳含量趋于饱和,土壤氧化还原电位(Eh)持续降低,mcrA 菌落重组导致 CH₄ 排放效应出现反弹^[41]。这些原因解释了 CH₄ 排放效应随着还田年限之间的相关性呈现先下降后反弹的现象。施氮量对 CH₄ 的排放效应也有重要的影响。戴相林等认为,氮肥施用量越多,CH₄ 的排放效应越强,这是因为秸秆还田后增加了产甲烷前体含量及其有效性^[42]。当增施氮肥后,可显著提高能被 mcrA 有效利用的可溶性有机碳和 NH₄⁺ - N 含量,进而激发 mcrA 的生长和活性,并抑制 pmOA 的生长和活性,最终增加 CH₄ 的排放^[43]。秸秆作为高碳源物质,随着秸秆还田量的增多,CH₄ 的排放效应也会变强。耕作方式对 CH₄ 的排放效应目前存在争议,一方面,欧茜等认为,免耕配合秸秆还田提高 pmOA/mcrA 的值和土壤 CH₄ 的氧化能力,减少稻田 CH₄ 的排放^[44];另一方面,Liu 等认为,旋耕对 CH₄ 的增排效应最大,其他耕作方式对稻田 CH₄ 的排放效果没有显著差异^[27]。本研究结果表明,秸秆还田搭配旋耕会显著

增加 CH₄ 的排放,旋耕会促进土壤微生物生物量碳(SMBC)的含量^[45],而 SMBC 中的微生物会分解有机质产生乙酸等物质,被 mcrA 吸收利用合成 CH₄,且在 SMBC 含量高的土壤中,好氧微生物呼吸作用强,会快速消耗土壤中的氧气,这也会促使 mcrA 的活动更强;秸秆还田搭配犁耕给 CH₄ 带来的促进效应最小,这和张雄智等得出的结论^[46]一致。相比于稻麦秸秆,油菜秸秆的 C/N 更低^[37],这减少了给 mcrA 的碳底物供应,因此油菜秸秆还田对 CH₄ 的排放增效应较低。

4 结论

通过 Meta 分析研究秸秆还田对水稻产量和 CH₄ 排放的影响,得出以下结论:第一,秸秆还田会显著增加水稻产量和 CH₄ 排放,但其效果受到不同农业管理措施的影响。第二,秸秆混施在增产和减排方面的综合效果显著优于秸秆覆盖;同时,犁耕法相较于其他耕作方式也展现出更优的增产减排效益。因此,将犁耕与秸秆混施相结合会取得更好的增产减排效果。第三,秸秆还田量、配施氮肥量、还田秸秆类型是水稻影响产量和 CH₄ 排放的重要因素。施加 6 000 ~ 9 000 kg/hm² 的油菜秸秆还田并配施 200 ~ 250 kg/hm² 的氮肥可以兼顾增产减排。但在实际应用中也要考虑各产地的自然因素,如东北地区年均气温低、黑土地肥力高、秸秆分解速率慢,适当减少秸秆还田量和配施氮肥量。

参考文献:

- [1] 李 炫,肖大康,胡 洋,等. 种植绿肥对我国水稻产量和土壤肥力影响的整合分析[J]. 中国土壤与肥料,2024(6):79-88.
- [2] 周文涛,戈家敏,王勃然,等. 不同水稻品种甲烷排放与土壤酶的关系[J]. 农业环境科学学报,2020,39(11):2675-2682.
- [3] Fletcher S E M, Schaefer H. Rising methane: a new climate challenge[J]. Science, 2019, 364(6444): 932-933.
- [4] 卞 清,孙 波,李大明,等. 有机物料还田对稻田土壤细菌群落和水稻产量的影响[J]. 环境科学, 2025, 46(1): 543-550.
- [5] 黄巧义,林碧珊,饶国良,等. 秸秆还田配施石灰对酸性水稻土有机碳及碳库管理指数的影响[J]. 环境科学, 2023, 44(10): 5813-5822.
- [6] 霍丽丽,赵立欣,孟海波,等. 中国农作物秸秆综合利用潜力研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(13): 218-224.
- [7] Wang X L, Yang Z L, Liu X, et al. The composition characteristics of different crop straw types and their multivariate analysis and comparison[J]. Waste Management, 2020, 110: 87-97.
- [8] 潘 越,李思宇,高 捷,等. 秸秆及其还田方式对不同轮作模式下稻田土壤性质影响的研究进展[J]. 作物杂志, 2024(2): 1-8.

- [9] Li H, Dai M W, Dai S L, et al. Current status and environment impact of direct straw return in China's cropland: a review [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 159: 293–300.
- [10] Islam M U, Guo Z C, Jiang F H, et al. Does straw return increase crop yield in the wheat–maize cropping system in China? a meta–analysis [J]. *Field Crops Research*, 2022, 279: 108447.
- [11] Liang Y, Al–Kaisi M, Yuan J C, et al. Effect of chemical fertilizer and straw–derived organic amendments on continuous maize yield, soil carbon sequestration and soil quality in a Chinese Mollisol [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, 314: 107403.
- [12] 董建新, 丛 萍, 刘 娜, 等. 秸秆深还对黑土亚耕层土壤物理性状及团聚体分布特征的影响 [J]. *土壤学报*, 2021, 58 (4): 921–934.
- [13] 叶子壮, 王松燕, 陆 潇, 等. 秸秆还田、覆膜和施氮对旱地麦田土壤质量的影响 [J]. *环境科学*, 2024, 45 (4): 2292–2303.
- [14] 孟宪喆, 李卓然, 李红宇, 等. 秸秆还田和施氮方式对寒地水稻生理特性、产量及品质的影响 [J]. *中国农业科技导报*, 2026, 28 (2): 184–196.
- [15] 贾瑞峰, 丛日环, 徐志宇, 等. 秸秆还田技术改善土壤理化性质提高作物产量的 Meta 分析 [J]. *农业工程学报*, 2025, 41 (4): 1–10.
- [16] Jiang Y, Qian H Y, Huang S, et al. Acclimation of methane emissions from rice paddy fields to straw addition [J]. *Science Advances*, 2019, 5 (1): eaau9038.
- [17] 蒋静艳, 黄 耀, 宗良纲. 水分管理对秸秆施用对稻田 CH_4 和 N_2O 排放的影响 [J]. *中国环境科学*, 2003, 23 (5): 552–556.
- [18] 杨正宇, 李宗明, 李言言, 等. 连续 11 年不同秸秆还田量下稻田甲烷增排效应变化研究 [J]. *土壤学报*, 2025, 62 (4): 1115–1126.
- [19] Luo Y Q, Hui D F, Zhang D Q. Elevated CO_2 stimulates net accumulations of carbon and nitrogen in land ecosystems: a meta–analysis [J]. *Ecology*, 2006, 87 (1): 53–63.
- [20] He Z J, Cao H X, Qi C, et al. Straw management in paddy fields can reduce greenhouse gas emissions: a global meta–analysis [J]. *Field Crops Research*, 2024, 306: 109218.
- [21] Wallace B C, Lajeunesse M J, Dietz G, et al. OpenMEE: intuitive, open–source software for meta–analysis in ecology and evolutionary biology [J]. *Methods in Ecology and Evolution*, 2017, 8 (8): 941–947.
- [22] Borenstein M, Hedges L V, Higgins J P T, et al. Random–effects model [M] // *Introduction to meta–analysis*. New York: Wiley New York, 2009: 69–75.
- [23] Araújo M B, Anderson R P, Márcia Barbosa A, et al. Standards for distribution models in biodiversity assessments [J]. *Science Advances*, 2019, 5: eaat4858.
- [24] Lou C C, Zhang Y, McLaughlin N B, et al. Changes in soil total nitrogen induced by crop residue return: a meta–analysis [J]. *Soil and Tillage Research*, 2023, 230: 105712.
- [25] Lu X J, Li Z Z, Sun Z H, et al. Straw mulching reduces maize yield, water, and nitrogen use in northeastern China [J]. *Agronomy Journal*, 2015, 107 (1): 406–414.
- [26] 刘兆辉, 薄录吉, 李 彦, 等. 氮肥减量施用技术及其对作物产量和生态环境的影响综述 [J]. *中国土壤与肥料*, 2016 (4): 1–8.
- [27] Liu D T, Song C C, Xin Z H, et al. Agricultural management strategies for balancing yield increase, carbon sequestration, and emission reduction after straw return for three major grain crops in China: a meta–analysis [J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 340: 117965.
- [28] Wang Y L, Wu P N, Mei F J, et al. Does continuous straw returning keep China farmland soil organic carbon continued increase? A meta–analysis [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 288: 112391.
- [29] Liu P, He J, Li H W, et al. Effect of straw retention on crop yield, soil properties, water use efficiency and greenhouse gas emission in China: a meta–analysis [J]. *International Journal of Plant Production*, 2019, 13 (4): 347–367.
- [30] Han X, Xu C, Dungait J A J, et al. Straw incorporation increases crop yield and soil organic carbon sequestration but varies under different natural conditions and farming practices in China: a system analysis [J]. *Biogeosciences*, 2018, 15 (7): 1933–1946.
- [31] Liu N, Li Y Y, Cong P, et al. Depth of straw incorporation significantly alters crop yield, soil organic carbon and total nitrogen in the North China Plain [J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 205: 104772.
- [32] Qin X L, Huang T T, Lu C, et al. Benefits and limitations of straw mulching and incorporation on maize yield, water use efficiency, and nitrogen use efficiency [J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 256: 107128.
- [33] Tan C J, Cao X, Yuan S, et al. Effects of long–term conservation tillage on soil nutrients in sloping fields in regions characterized by water and wind erosion [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 17592.
- [34] Xia L L, Lam S K, Yan X Y, et al. How does recycling of livestock manure in agroecosystems affect crop productivity, reactive nitrogen losses, and soil carbon balance? [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51 (13): 7450–7457.
- [35] Álvaro–Fuentes J, López M V, Cantero–Martínez C, et al. Tillage effects on soil organic carbon fractions in Mediterranean dryland agroecosystems [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, 72 (2): 541–547.
- [36] 张雄智, 李帅帅, 刘冰洋, 等. 免耕与秸秆还田对中国农田固碳和作物产量的影响 [J]. *中国农业大学学报*, 2020, 25 (5): 1–12.
- [37] Lin J J, Meng J, He Y, et al. The effects of different types of crop straw on the transformation of pentachlorophenol in flooded paddy soil [J]. *Environmental Pollution*, 2018, 233: 745–754.
- [38] 胡 诚, 陈云峰, 乔 艳, 等. 秸秆还田配施腐熟剂对低产黄泥田的改良作用 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22 (1): 59–66.
- [39] Liu C, Lu M, Cui J, et al. Effects of straw carbon input on carbon dynamics in agricultural soils: a meta–analysis [J]. *Global Change Biology*, 2014, 20 (5): 1366–1381.
- [40] 李心雨, 邓 姣, 朱 杰, 等. 秸秆还田和种植制度对长江中游稻田温室气体排放的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2024, 43 (8): 1915–1927.

代新俊,郝 煜,闫子倩,等. 2014—2023 年山西省小麦生产体系碳氮足迹的年际演变特征及构成分析[J]. 江苏农业科学,2026,54(13):268–275.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2026.13.033

2014—2023 年山西省小麦生产体系碳氮足迹 的年际演变特征及构成分析

代新俊,郝 煜,闫子倩,安君灿,张甜甜,李 慧

(忻州师范学院生命科学系,山西忻州 034000)

摘要:阐明山西省小麦生产体系碳氮排放的年际变化特征,对我国实现“碳中和、碳达峰”的“双碳”目标至关重要。基于生命周期评价法(LCA),定量分析 2014—2023 年山西省小麦碳氮足迹及其构成,以期对山西省小麦绿色低碳生产提供理论依据。结果表明,2014—2023 年间,山西省小麦生产体系的单位面积成本和单位产量成本均呈上升趋势,2021 年后明显增加;农资投入成本主要为机械(占比 41.94%~48.27%)和肥料(占比 32.19%~34.78%);小麦单位面积碳足迹和单位产量碳足迹分别为 2.31 t/hm²、0.55 t/t,单位面积氮足迹和单位产量氮足迹分别为 78.95 kg/hm²、18.74 g/kg,碳足迹和氮足迹在时间序列上总体呈下降趋势;在碳足迹构成中,机械作业(含灌溉与柴油消耗)和施肥环节是小麦生产碳足迹的主要来源,对碳排放的贡献率分别为 47.41%、43.66%;NH₃ 挥发是小麦活性氮排放的主要路径;单位面积氮足迹、单位产量碳氮足迹均随小麦单产提高而显著降低。减少机械作业与施肥环节的碳排放、增加秸秆碳固定是降低小麦生产碳氮足迹的重要途径。在农业生产中,可大力推广水肥一体化、有机肥替代化肥、秸秆还田及运用轻便型农用机械等方式,以提高肥料利用率和机械生产效率,从而降低小麦生产过程中的碳氮排放,实现小麦生产绿色低碳可持续发展。

关键词:小麦生产体系;生命周期法;碳氮足迹;绿色低碳;秸秆碳固定

中图分类号:F326.11 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2026)13-0268-08

工业化进程以来,人为温室气体排放量持续增加,驱动气候变化成为全球性生态危机,降低温室气体排放总量成为各个国家亟需应对的核心生态任务^[1]。全球温室气体排放总量的 10% 以上来自农业生产活动,我国温室气体排放量和农业产量均

居世界首位,巨大的人口基数使我国在温室气体减排方面面临巨大压力^[2]。农业生产是我国温室气体排放的第三大来源,其排放规模仅次于工业生产和能源活动,农业生产排放的温室气体总量超过 8 亿 t 当量 CO₂^[3]。因此,在双碳目标下,对作物播种、施肥、灌溉和收获等全生产链条进行碳氮排放优化管理,既能推动我国农业可持续发展,也对保障我国粮食安全具有重要现实意义。

为科学制定农业生产碳氮减排策略,需首先精准量化不同生产环节的温室气体排放规模,碳足迹与氮足迹正是用于定量评估作物从播种至收获各环节碳氮排放的核心评价指标^[4-5]。生命周期法

收稿日期:2026-01-21

基金项目:山西省基础研究计划(编号:202403021222331);山西省高等学校科技创新项目(编号:2024L328)。

作者简介:代新俊(1993—),男,山西晋中人,博士,讲师,主要从事农业碳氮足迹研究。E-mail:18335072301@163.com。

通信作者:李 慧,博士,讲师,主要从事作物高产栽培与资源高效利用研究。E-mail:18735423170@163.com。

[41] Qian H Y, Zhu X C, Huang S, et al. Greenhouse gas emissions and mitigation in rice agriculture [J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2023, 4(10): 716–732.

[42] 戴相林,刘雅辉,孙建平,等. 秸秆还田和氮肥减施对滨海盐渍土稻田温室气体排放及氮肥利用率的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2023, 29(4): 994–1005.

[43] Zhang W Z, Sheng R, Zhang M M, et al. Effects of continuous manure application on methanogenic and methanotrophic communities and methane production potentials in rice paddy soil

[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2018, 258: 121–128.

[44] 欧 茜,何 君,熊 瑞,等. 长期秸秆还田与耕作方式对稻田土壤有机碳及甲烷功能基因的影响[J]. 江苏农业科学, 2024, 52(22): 222–227.

[45] 唐志伟,翁 颖,朱夏童,等. 秸秆还田下中国农田土壤微生物生物量碳变化及其影响因素的 Meta 分析[J]. 生态环境学报, 2023, 32(9): 1552–1562.

[46] 张杏雨,李思宇,余 锋,等. 作物秸秆还田对稻田温室气体排放效应的研究进展[J]. 杂交水稻, 2021, 36(5): 1–7.